

Astroparticules & Cosmologie

L'Univers comme source de particules

L'Univers présente des phénomènes uniques, impossibles à reproduire en laboratoire.

Des particules, particulièrement celles de très haute énergie – d'origine solaire, galactique ou extragalactique selon leur nature et leur énergie – bombardent la Terre de manière continue. Si les mécanismes d'interaction avec notre environnement local et les particules créées alors sont bien connus aujourd'hui (sauf pour les énergies les plus extrêmes), les lieux et les mécanismes de production de ce rayonnement cosmique demeurent largement mystérieux. Identifier ces lieux, comprendre comment les particules sont accélérées et interagissent avec le milieu galactique constituent les objectifs de la physique du rayonnement cosmique. Les enjeux sont de nature astrophysique, mais aussi de physique fondamentale, à travers l'étude des composantes rares du rayonnement cosmique ou à travers celle des rayons cosmiques d'énergie extrême qui ouvre l'accès à un domaine bien au-delà de celui exploré par les accélérateurs de particules.

On peut détecter, aujourd'hui, les photons libérés au moment du découplage entre matière et rayonnement et émis sous forme d'un rayonnement de corps noir parfait lorsque l'Univers était très jeune et encore extraordinairement homogène. La mesure précise des propriétés de ce rayonnement fossile est l'un des moyens observationnels les plus puissants disponibles pour caractériser le contenu et la géométrie de l'Univers ainsi que son origine et son évolution globale.

Concernant le contenu de l'univers nous savons aujourd'hui qu'environ 85% de la matière est de nature non baryonique. Cette composante – non observée directement – est appelée matière noire. De plus l'accélération de l'expansion de l'Univers que l'on observe pourrait être produite par une composante dite énergie noire – essentiellement inconnue – mais qui constituerait le contenu dominant de l'Univers. Déterminer la nature exacte de la (ou des) particule(s) qui constitue la matière noire est un défi majeur, si la physique des particules propose des candidats tels que le neutralino, la détection directe ou indirecte permettrait une formidable avancée dans ce domaine, à la fois en cosmologie et en physique des hautes énergies. De même, comprendre la nature de l'énergie noire en la sondant par plusieurs approches constitue un autre défi pour le XXI^e siècle.

Des instruments dédiés

Des instruments spécifiques doivent être conçus, construits puis exploités afin de mener à bien les divers objectifs scientifiques. Le LPSC apporte une contribution instrumentale majeure aux expériences auxquelles il participe. Dans le cadre de collaborations nationales ou internationales, pour des instruments au sol, embarqués en ballon ou sur des satellites, que ce soit en électronique, mécanique, instrumentation ou informatique, ingénieurs, techniciens et physiciens mettent tout en œuvre pour assurer la réussite de ces expériences.



Fig1 : Lancement de la navette Endeavour le 16 mai 2011 emportant le détecteur AMS-02 vers la station spatiale internationale.

Parmi les expériences maintenant entrées en phase d'exploitation, on peut citer l'expérience AMS-02 installée en mai 2011 sur la station spatiale, qui mesure depuis le rayonnement cosmique avec une précision statistique inégalée, l'expérience ballon CREAM qui mesure le rayonnement cosmique à plus haute énergie grâce à des vols en ballon au dessus du continent antarctique. L'expérience Auger, qui s'étend sur 3000 km² en Argentine, détecte les rayons cosmiques les plus énergétiques qui frappent la Terre. Grâce à la statistique accumulée depuis 2004 elle a apporté les premières réponses aux énigmes posées par l'origine, la propagation et les interactions de ces particules d'énergie extrême. Le satellite Planck lancé en 2009 mesure depuis le rayonnement fossile, son objectif est la mesure définitive des anisotropies primaires en température et une première mesure exploitable pour la cosmologie du mode E de polarisation.

Le laboratoire est aussi impliqué dans des expériences en phase de construction ou d'installation, ainsi le projet EASIER permettra d'adjoindre au détecteur Auger un réseau d'antennes pour détecter l'émission radio des gerbes atmosphériques. Le laboratoire est depuis 2006 impliqué dans la construction du télescope LSST qui tentera de mieux comprendre la nature de l'énergie noire.

En parallèle, des programmes de R&D ambitieux et destinés à définir les détecteurs du futur sont très présents dans le laboratoire, ainsi le projet MIMAC a pour objectif la détection directionnelle de matière noire et le projet NOY explore une nouvelle voie pour la détection des neutrinos de très haute énergie dans une configuration montagne-vallée tout près de Grenoble.

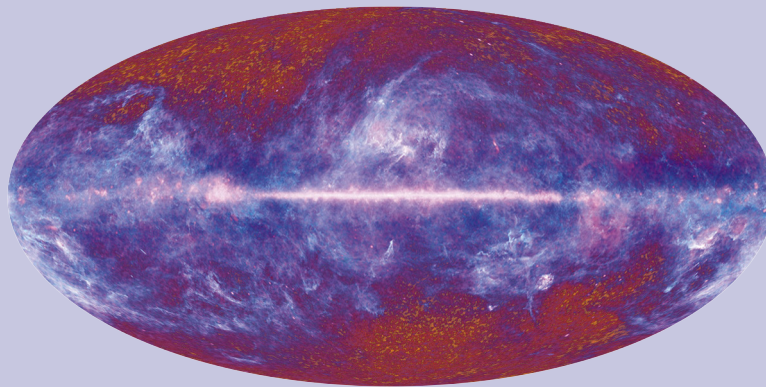


Fig 2 : Carte issue des observations du satellite Planck d'aout 2009 à juin 2010 : tout le ciel a été observé. Crédits : ESA - consortia Planck HFI/LFI.

Analyser et interpréter

Des mesures expérimentales, il faut ensuite extraire les informations pertinentes souvent noyées dans un «bruit de fond» parfois supérieur au signal de plusieurs ordres de grandeur, les comparer aux modèles afin de les affiner, les confronter aux théories afin de les valider – ou non. De la plus proche des données à la plus théorique, ces études sont résumées dans les pages qui suivent, en lien avec leurs expériences.

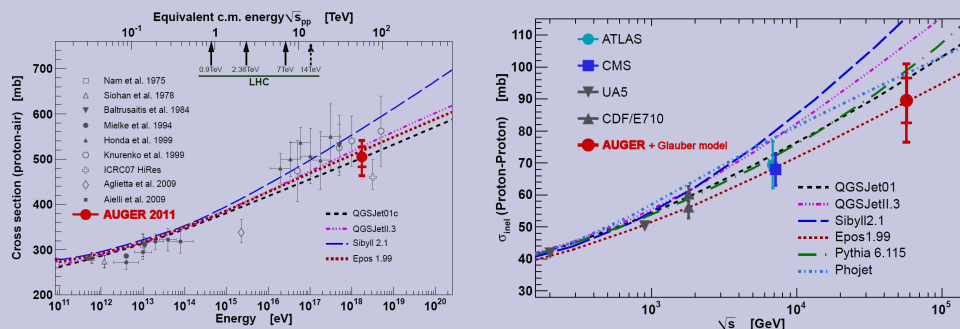


Fig. 3 : Section efficace proton-air mesurée par AUGER à une énergie dans le centre de masse de 57 TeV, soit près d'un ordre de grandeur au dessus de l'énergie actuelle du LHC. Ce résultat est converti de manière fiable en une valeur de la section efficace proton-proton et peut ainsi être comparé aux résultats récents sur collisionneur afin de contraindre les modèles d'interaction hadronique.

Rayonnement cosmique de haute énergie

A. Barrau, M. Buénerd, B. Coste, L. Derome, W. Gillard, D. Maurin, J.-S. Ricol
L. Eraud, O. Bourrion, J.-P. Scordilis, Service Électronique

A century after the discovery of cosmic rays, their origin and propagation processes still evade us. The LPSC participates in two major experiments of direct detection covering the GeV-PeV energy range: AMS-02 on the International Space Station (since 19 May 2011), and CREAM, a balloon-borne experiment flown six times in Antarctica. Involved earlier with the detector development and construction, the group main activities are data analysis and their interpretation. An MCMC technique was developed to estimate (from the data) the probability density function of the propagation parameters, which are key quantities to investigate Galactic astrophysics and dark-matter detection.

Mesure directe du Rayonnement Cosmique

Expérience AMS¹

Le rayonnement cosmique (RC) galactique a été découvert il y a maintenant un siècle. Il s'agit de particules énergétiques, principalement des noyaux ionisés qui ont pu être produits et accélérés à des énergies relativistes dans les fronts de chocs associés à des explosions d'étoiles (super novae). Ces particules sont ensuite propagées et diffusées dans la galaxie et notre système solaire. Le flux de particule frappant la partie supérieure de l'atmosphère terrestre est de l'ordre de 1000 particules par m² et par seconde.

Bien qu'étudié depuis un siècle, le RC est toujours un domaine scientifique de grande activité tant d'un point de vue expérimental que théorique. En effet, de nombreuses questions sont toujours sans réponses quant à son origine et aux processus de propagation. De plus, certaines composantes rares du RC peuvent permettre de sonder la présence de matière noire dans notre Galaxie via les particules produites lors de leur annihilation.



Fig. 1 : Détecteur AMS-02 installé sur la station internationale.

Notre groupe est impliqué dans la physique du RC depuis 1997 avec la participation du laboratoire à AMS-01, le vol précurseur d'AMS-02 à bord de la navette spatiale.

L'expérience AMS-02 a pour objectif de mesurer très précisément la composition du RC d'énergie entre quelques centaines de MeV et jusqu'au TeV. Les mesures ont pour ambition d'être « définitives » dans cette plage d'énergie.

Le LPSC a été impliqué dans la construction de l'imageur Cherenkov (RICH) d'AMS-02. Ce détecteur a pour fonction de mesurer très précisément la charge et la vitesse des particules traversant le détecteur, c'est un élément essentiel pour l'identification des particules du RC. Le LPSC, qui a contribué à la conception du détecteur, a eu pour responsabilité la caractérisation, les tests et l'intégration des photomultiplicateurs et la réalisation de l'électronique *front-end*. L'ensemble des cellules de photomultiplicateurs a été livré en 2005 pour l'intégration du détecteur et les tuiles d'aérogel ont été livrées et intégrées dans le détecteur en 2007.

Le détecteur, après avoir été reconfiguré pour utiliser un aimant permanent à la place de l'aimant supraconducteur, a été livré au Kennedy Space Center en août 2010. Le lancement du vol de la navette spatiale Endeavour STS-134 embarquant AMS-02 a eu lieu le 16 mai 2011. Le 19 mai, AMS-02 était installé sur la station spatiale et mis en fonctionnement. Le contrôle de l'instrument (depuis le SOC) s'est fait dans un premier temps depuis le JSC à Houston puis a été transféré en fin juin au CERN.

¹ Alpha Magnetic Spectrometer

Le LPSC a participé au contrôle du détecteur à Houston lors de la phase de démarrage et participe aux *shifts* au CERN. Nous travaillons sur l'analyse des données du détecteur et sur la physique associée au détecteur RICH, en particulier :

- Mesure des flux élémentaires pour la physique du RC (Be, B, C...).
- Identification isotopique grâce à la méthode utilisant le champ magnétique terrestre: la nouvelle configuration du détecteur, avec un champ permanent, rend très difficile l'identification isotopique dans AMS. Nous avons développé une méthode originale que nous avons proposée pour AMS.
- Étude de la fragmentation des rayons cosmiques dans le détecteur. L'interaction des rayons cosmiques dans le détecteur va être une source de systématique importante dans les mesures d'AMS, il donc nécessaire d'étudier de près ces processus pour maîtriser les erreurs systématiques dans AMS.

Expérience CREAM²

Dans le contexte des importants retards sur le programme AMS-02, le groupe du LPSC s'est engagé sur le projet CREAM en 2005. L'expérience CREAM est une expérience embarquée sur ballon stratosphérique. Son objectif est de mesurer le rayonnement cosmique entre 1 TeV et 1 PeV, dans un domaine d'énergie complémentaire de celui d'AMS-02. Dans ce domaine d'énergie, la mesure du rayonnement cosmique permettra de mieux comprendre à la fois les processus de production ainsi que les processus de propagation du rayonnement cosmique. De plus la région autour de 10 PeV, appelée le genou, est particulièrement intéressante car il est avéré que le spectre du rayonnement cosmique change d'indice autour de cette énergie. Finalement, la mesure des spectres à plus basse énergie avec une expérience comme CREAM permettra d'étalonner les détecteurs au sol qui étudient la structure du genou, comme l'expérience KASCADE.

Pour l'ensemble de la physique de CREAM, l'identification des éléments (mesure de la charge) est donc une tâche centrale. Le groupe du LPSC, invité à rejoindre cette collaboration, a proposé de construire un imageur Cherenkov appelé CherCam, dérivé du RICH d'AMS-02.

CherCam a été construit au cours de l'année 2006 et il a participé aux campagnes de vol en Antarctique pendant les saisons 2007-2008 (CREAM III), 2008-2009 (CREAM IV), 2009-2010 (CREAM V) et 2010-2011 (CREAM VI). Nous travaillons à l'analyse des données et en particulier à la mesure des flux de Bore et CNO (Carbone - Azote - Oxygène) à haute énergie.



Fig. 2: Lancement de CREAM lors de la campagne de vol 2010-2011.

Depuis la mise en service du détecteur CherCam, le service électronique du laboratoire a participé aux opérations de maintenance de l'instrument, de récupération du détecteur après chaque vol, ainsi qu'au reconditionnement et à la réintégration de CherCam dans l'ensemble CREAM.



Fig. 3: Un des modules d'alimentation 12 kV spécifiquement développés pour fonctionner dans une atmosphère à faible pression résiduelle.

Une des difficultés spécifiques des vols ballons est le fonctionnement des détecteurs dans une atmosphère résiduelle de l'ordre de quelques millibars. À cette pression, la tension de claquage devient très faible et tous les points de haute tension dans le détecteur doivent être protégés contre ces claquages. La réalisation d'alimentation haute tension constitue dans ces conditions un véritable challenge et des alimentations hautes tensions spécifiques ont été entièrement réalisées pour CherCam. Dans le prolongement de cette activité, le service électronique a développé des alimentations 12 kV pour les HPD³ du calorimètre de CREAM. Ces modules ont été développés et réalisés au laboratoire et sont utilisés dans les campagnes de vol depuis CREAM VI.

Phénoménologie du Rayonnement Cosmique et Recherche indirecte de Matière Noire

La physique du rayonnement cosmique Galactique (RCG) et la recherche indirecte de matière noire font partie des objectifs majeurs de l'expérience AMS-02. Les abondances des ions du RCG mesurées au niveau de la terre sont des indicateurs des processus d'accélération (dans les ondes de choc issues par exemple de l'explosion des supernovae), de transport (par interaction sur les champs magnétiques réguliers mais surtout turbulents de la Galaxie), et d'interactions du RCG avec le gaz du milieu interstellaire. Ces processus astrophysiques doivent être bien modélisés pour espérer mettre en évidence un signal d'annihilation de particules de matière noire (présentes en abondance dans notre Galaxie).

La phénoménologie du RCG consiste à fournir et ajuster les paramètres des modèles de propagation en utilisant les multiples espèces d'ions à disposition : espèce dites primaires (p, He, C, O...) qui sont les plus abondantes et qui tracent les sources du RCG ; espèces dites secondaires (2H, 3He, B...) qui tracent les mécanismes de transport dans la Galaxie. Les mesures d'AMS-02 dans la gamme d'énergie du GeV au TeV ainsi que les mesures complémentaires menées par les vols ballon CREAM du TeV au PeV, de part leur précision inégalée, devraient permettre de changer radicalement ces études. Pour accompagner ces mesures de précision, nous avons développé ces trois dernières années des outils basés sur la Markov Chain Monte Carlo (MCMC). Utilisé pour la première fois dans le cadre du rayonnement cosmique, cet outil statistique nous a montré sa puissance. Nous avons par ailleurs montré que certaines incertitudes systématiques sont déjà dominantes pour l'interprétation des données (ce qui peut limiter le pouvoir de détection de matière noire par AMS-02). L'outil MCMC nous a aussi permis d'étudier divers types de noyaux primaires et secondaires et les contraintes que chacune de ces espèces amènent.

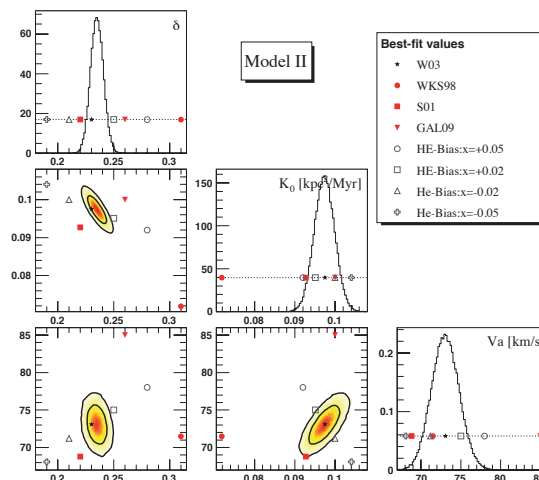


Fig. 4: Fonction de densité de probabilité marginalisées 1D (diagonale) et 2D (hors diagonale) de trois paramètres critiques du RCG. La position des points montre que que les variations dues aux erreurs systématiques sur les jeux de section efficace nucléaire (W03, WKS98, GAL09...) sont déjà plus grandes que les erreurs statistiques obtenues par ajustement sur les données pré-AMS (tiré de Maurin et al., 2010).

La recherche de matière noire peut se faire aussi par le biais de particules neutres. Dans le cas de l'astronomie γ au TeV (avec des détecteurs comme H.E.S.S.) et pour certaines cibles comme les galaxies naines sphériques, le fond astrophysique est quasi-nul, alors que la dynamique des objets est dominée par leur contenu en matière noire. La difficulté vient alors de l'estimation précise du signal d'annihilation. En utilisant les données cinématiques des étoiles (de ces objets) et en utilisant un analyse MCMC, nous avons pu mettre des bornes précises sur le signal attendu et les perspectives de détection et/ou contraintes qui peuvent être mises de manière robuste sur les modèles de nouvelle physique en cas de non-détection.

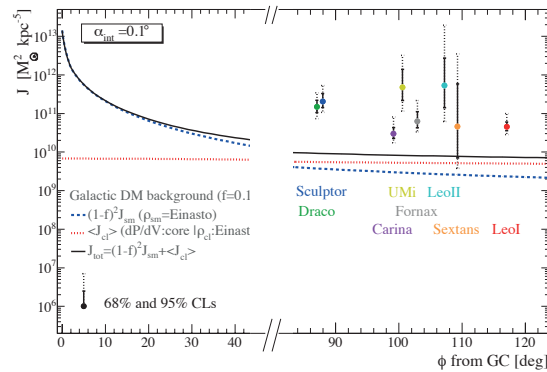


Fig. 5: Signal d'annihilation de matière noire en g pour le halo Galactique (lignes) et contribution des huit galaxies naines sphéroïdes classiques (Sculptor, Draco...) avec leurs niveaux de confiance à 68% et 95% (tiré de Charbonnier et al., 2011).

Pour en savoir plus

Sur la mesure directe du Rayonnement cosmique

Design and construction of a Cherenkov imager for charge measurement of nuclear cosmic rays, O. Bourrion, C. Bernard, D. Bondoux, J.-L. Bouly, J. Bouvier et al, *Journal of Instrumentation* 6 (2011) P06004

Phénoménologie et détection des ions du rayonnement cosmique avec l'expérience CREAM, Antje Putze, thèse de l'Université Joseph Fourier (2009)

Sur la phénoménologie du Rayonnement cosmique

A Markov Chain Monte Carlo technique to sample transport and source parameters of Galactic cosmic rays. II. Results for the diffusion model combining B/C and radioactive nuclei, A. Putze, L. Derome, D. Maurin, *Astronomy & Astrophysics* 516, (2010) A66

Systematic uncertainties on the cosmic-ray transport parameters. Is it possible to reconcile B/C data with $\delta = 1/3$ or $\delta = 1/2$?, D. Maurin, A. Putze, L. Derome, *Astronomy & Astrophysics* 516, (2010) A67

p, He, and C to Fe cosmic-ray primary fluxes in diffusion models. Source and transport signatures on fluxes and ratios, A. Putze, D. Maurin, F. Donato, *Astronomy & Astrophysics* 526, (2011) A101

Constraining Galactic cosmic-ray parameters with $Z \leq 2$ nuclei, B. Coste, L. Derome, D. Maurin, A. Putze, *arXiv:1108.4349*

Sur la recherche indirecte de matière noire

Dark Matter in the Classical Dwarf Spheroidal Galaxies: A Robust Constraint on the Astrophysical Factor for γ -Ray Flux Calculations, M. G. Walker, C. Combet, J. A. Hinton, D. Maurin, M. I. Wilkinson, *Astrophysical Journal Letter* 733 (2011) 46

Dark matter profiles and annihilation in dwarf spheroidal galaxies: perspectives for present and future gamma-ray observatories - I. The classical dSphs, A. Charbonnier, C. Combet, M. Daniel et al., *MNRAS*, (*arXiv:1104.0412*, à paraître dans *MNRAS*)

Rayons cosmiques d'ultra haute énergie

M. Avenier, C. Bérat, J. Chauvin, D-H. Koang, D. Lebrun, S. Le Coz, K. Louedec, F. Montanet, A. Stutz, M. Tartare
 C. Bernard, M. Chala, M. Marton, P. Stassi, Service Détecteurs et Instrumentation
 F. Melot, G. Dargaud, C. Gondrand, Service Informatique
 E. Lagorio, J.-P. Scordilis, Service Électronique

Research on Ultra High Energy Cosmic Rays is carried out by our team within the Pierre Auger Collaboration. The team participates to the monitoring and maintenance of the experiment. Data analysis is performed, in particular to search for high energy cosmic neutrinos. The team is also involved in R&D for shower radio detection in the framework of the P. Auger Observatory as well as on a small scale and local project aiming at the detection of neutrinos interacting in mountains.

Introduction

Les rayons cosmiques d'ultra haute énergie (RCUHE) permettent aux physiciens d'explorer le monde subatomique dans un domaine d'énergie bien au-delà des possibilités des accélérateurs, et ouvrent de nouvelles fenêtres d'observation pour l'astronomie. Notre groupe a fait de la physique des RCUHE son thème de recherche depuis 2001, et a rejoint en 2006 la collaboration internationale Pierre Auger (17 pays, 70 laboratoires dont 6 français).

L'Observatoire Pierre Auger étudie les RCUHE, en utilisant conjointement deux techniques de détection des gerbes atmosphériques générées par les interactions des particules cosmiques primaires avec l'atmosphère. Situé dans la pampa argentine, il est constitué d'un réseau de 1660 détecteurs Cherenkov répartis sur 3000 km² (échantillonnage des particules de la gerbe) et de 24 télescopes de fluorescence (développement longitudinal de la gerbe) : c'est le plus grand détecteur de rayons cosmiques en fonctionnement. Entré en opération en 2004, son déploiement s'est achevé en 2008. Il a ensuite été complété pour étendre le domaine de détection à plus basse énergie.

L'analyse des événements détectés a apporté les premières réponses aux énigmes posées par l'observation des RCUHE.

- Leur spectre en énergie est mesuré avec une précision inégalée de 1 à 100 EeV (1 EeV = 10¹⁸ eV), et la forte diminution du flux au-delà de 40 EeV est confirmée de façon indiscutable; la nature de cette atténuation reste incertaine: coupure due à l'interaction des RCUHE dans leur propagation avec les photons du fond cosmologique, ou limite en énergie intrinsèque à leurs sources ?
- L'absence clairement établie de flux prédominants de photons et de neutrinos tels que prédits par les modèles attribuant l'origine des RCUHE à la désintégration de particules super massives, reliques du Big Bang, défavorisent ces modèles au profit des modèles d'accélération dans des sites astrophysiques.
- La forte corrélation entre la direction d'arrivée des rayons cosmiques d'énergie supérieure à 50 EeV et la position des noyaux actifs de galaxies situés à moins de 75 Mpc, observée dans les premières données et rapportée par la collaboration en 2007, s'est considérablement amoindrie dans les données récentes. Si l'hypothèse isotrope est encore exclue à mieux que 99% de degré de confiance, la proportion d'événements en corrélation est tombée de 65% à 38%.
- L'interprétation des mesures concernant le maximum de développement des gerbes suggère une évolution de la composition du rayonnement cosmique des noyaux légers vers des noyaux lourds, entre 40 et 50 EeV. Ce résultat semble en première approche difficile à concilier avec l'observation de corrélations angulaires.
- Une meilleure compréhension des RCUHE passe par la mise en œuvre de nouvelles observables, complémentaires de celles déjà disponibles. C'est une des motivations principale pour le développement de méthodes innovantes de détection des gerbes atmosphériques, afin de compléter les possibilités de l'Observatoire Pierre Auger.

Nous sommes engagés dans des activités techniques nécessaires au bon fonctionnement de l'Observatoire (contrôle en ligne du détecteur de surface) et des R&D menées en vue de ses extensions et de son amélioration (contrôle de l'acquisition pour le réseau AERA¹; études mécaniques pour les détecteurs du réseau RDA²). Nous participons à la recherche de neutrinos cosmiques d'ultra-haute énergie dans les données de l'Observatoire, et sommes impliqués dans l'étude des interactions hadroniques aux énergies extrêmes. Fort de l'expérience acquise récemment dans la radio-détection des gerbes, le groupe s'est engagé dans le projet EASIER³, amélioration de l'observatoire Pierre Auger aux énergies les plus hautes, projet pour lequel des activités de développement d'antennes, ainsi que d'analyse de données, ont été intensivement menées.

Les connaissances acquises dans la recherche de neutrinos d'ultra-haute énergie (ν UHE) d'une part, et dans le développement de stations de détection autonomes d'autre part, nous a permis de proposer, développer et déployer

¹ Auger Engineering Radio Array

² R&D Array

³ Extensive Air Showers Identification with Electron Radiometers

en site isolé de montagne le « télescope » NOY⁴ entièrement autonome avec son système d'acquisition embarqué. Ce télescope est dédié à l'observation des gerbes atmosphériques horizontales induites par l'interaction des n cosmiques dans les montagnes autour de Grenoble.

Contributions techniques pour l'observatoire Pierre Auger

Le contrôle en ligne

L'Observatoire Pierre Auger doit fonctionner en continu pendant plusieurs années. Pour surveiller le fonctionnement de l'ensemble des détecteurs du site et du dispositif d'acquisition des données, un outil de contrôle en ligne a donc été développé. Le groupe du LPSC s'est engagé dans le contrôle du détecteur de surface (SD), constitué de 1660 cuves cylindriques remplies d'eau pure. La lumière Cherenkov produite par les particules de la gerbe dans l'eau d'une cuve est vue par trois photomultiplicateurs dont les signaux sont numérisés par des convertisseurs rapides. L'alimentation électrique de chaque détecteur est assurée par un ensemble de panneaux solaires et de batteries, et le transfert des données se fait par un système de communication radio. Le fonctionnement de chacun de ces éléments doit être contrôlé en ligne.

L'interface avec les bases de données stockant les informations pertinentes sur le fonctionnement de l'Observatoire est un serveur web. Le groupe du LPSC, avec la forte implication d'un ingénieur du service informatique, a développé d'une part des bases de données, et d'autre part un ensemble de programmes pour interroger les différentes bases de données de l'Observatoire et afficher les informations pertinentes, sur le site Web.

Le groupe ayant conçu et développé le système d'authentification pour l'accès au site, continue d'assurer l'amélioration de l'interface de gestion des utilisateurs et de leurs droits. Pour faciliter l'accès au site aux collaborateurs, ainsi que l'utilisation des pages Web relatives au détecteur de surface développées depuis 2007, les pages de l'ancien système ont été intégrées dans le nouveau et un important effort de documentation a été réalisé. Le groupe s'est attaché à améliorer les différents modes d'affichage des informations relatives à l'état du SD en tenant compte des remarques et suggestions reçues. Dans l'optique de la mise en place progressive d'un système de « shifts » concernant le SD, le groupe a développé des fonctionnalités spécifiques, et teste la possibilité de réaliser des shifts à distance.

Le groupe a généralisé le système qu'il avait conçu et développé pour la gestion des maintenances du détecteur de surface, afin de permettre son extension éventuelle à l'ensemble de l'observatoire, et a revu la conception de celui du SD pour lui assurer une plus grande flexibilité. En particulier, le groupe a développé un formulaire de maintenance devant être rempli directement sur un PC portable lors des interventions du personnel de l'Observatoire dans la pampa, et devant être interfacé avec les différentes bases de données du site pour le suivi et l'historique des maintenances réalisées.

Afin d'évaluer les performances de l'Observatoire et l'évolution de ces performances, plusieurs dispositifs ont été développés et mis à disposition de la collaboration, via le site de contrôle en ligne. Il s'agit du calcul en ligne de l'acceptance, de la détection des photomultiplicateurs qui ne passent pas les critères de qualité, de la consultation de « métriques de qualité », tels que le nombre de cuves en fonctionnement par rapport au nombre installé, le nombre de cuves n'envoyant plus de données au système d'acquisition central... Le système ainsi mis en place est plus qu'un simple contrôle en ligne.

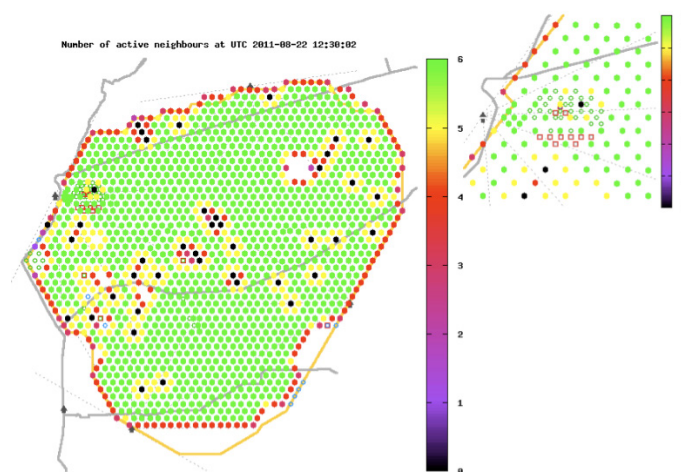


Fig. 1: Carte du détecteur au sol permettant de voir, pour chaque station, combien de stations voisines sont actives (de 0 à 6). Cette information sert à la détermination de l'acceptance.

⁴ Neutrino ObservatorY

Le contrôle de l'acquisition pour AERA

Une première série d'une vingtaine d'antennes parmi les 160 stations de détection radio VHF prévues pour AERA ont été installées sur le site de l'Observatoire Pierre Auger. Les émissions radio liées aux gerbes atmosphériques sont détectées soit en mode auto-déclenché, soit en coïncidence avec le détecteur de surface et les détecteurs de fluorescence (Coihueco et Heat), pouvant réaliser ainsi une mesure «radio-hybride». Le seuil de détection étant de l'ordre de 10^{17} eV, il sera possible d'étudier en détail le mécanisme responsable de l'émission radio dans la bande VHF et en particulier la région de transition entre 10^{17} et 10^{18} eV.

L'acquisition des données est assurée par trois tâches, communicant par des «sockets»: la gestion des antennes, la gestion de l'acquisition et reconstruction des événements principalement leur direction et la détection de multiplicité des stations en coïncidence. Le LPSC a pris la responsabilité du développement d'une interface graphique utilisateur (GUI) pour le contrôle et la commande de l'acquisition via le Web, l'intégralité du système d'acquisition pouvant être configurée par cette interface. Ce travail comprend en outre la définition et l'écriture du cahier des charges, son développement en technologies Web ainsi que son intégration aux modules développés par d'autres groupes de la collaboration. Il a notamment été nécessaire de développer un canal de communication entre cette interface et les «sockets» nécessaire à l'envoi de requêtes. Cette interface est d'ores et déjà fonctionnelle et sera prochainement implantée sur le serveur de l'expérience.

Études mécaniques pour un réseau géant

À l'origine de l'Observatoire Pierre Auger, il était prévu de déployer un observatoire dans chaque hémisphère afin d'assurer une couverture complète du ciel. Suite aux premiers résultats montrant la forte diminution du flux à 40 EeV, une surface beaucoup plus grande ($> 20000 \text{ km}^2$) a été considérée pour le site nord afin d'améliorer la précision statistique à ces énergies.

Les études de R&D sont entreprises à l'aide d'un mini réseau de 10 stations installé près de Lamar dans le Colorado. Ces études ont pour but de tester des améliorations apportées au design actuel du site sud. Il s'agit entre autres de minimiser les coûts, par l'utilisation d'un seul photomultiplicateur avec une électronique de plus grande dynamique, réduire les influences des conditions climatiques extérieures par une meilleure isolation thermique, et simplifier la maintenance par une meilleure protection de l'électronique. Le groupe et les services techniques du LPSC y ont contribué par l'élaboration d'un module optique avec enceinte étanche pour le photomultiplicateur et l'électronique.

Analyse des données de l'observatoire

Les neutrinos

L'Observatoire Pierre Auger est impliqué dans la recherche de neutrinos d'ultra haute énergie, notamment par le biais de l'étude des neutrinos à incidence rasante (c'est à dire arrivant sous l'horizon) susceptibles d'interagir dans la croûte terrestre. Une limite sur le flux de neutrinos tau a déjà été établie via cette méthode et reste la meilleure limite actuelle dans cette gamme d'énergie.

Nous nous sommes, cette fois, intéressés à la sensibilité de l'observatoire aux neutrinos électroniques à incidence rasante. En effet, un neutrino électronique interagissant au sein de la croûte terrestre par courant chargé produit un électron à UHE emportant plus de 80% de l'énergie du neutrino incident. Cet électron et les fragments hadroniques qui l'accompagnent produisent une gerbe souterraine à dominante électromagnétique dont le développement est retardé par l'effet LPM⁵, effet se manifestant à haute énergie dans un milieu suffisamment dense. Ce ralentissement des processus radiatifs permet à la gerbe de parcourir des distances relativement importantes dans la roche, augmentant de ce fait la masse de cible potentielle et donc la sensibilité du réseau de surface détectant ces gerbes émergentes. Il s'avère cependant qu'à ces énergies, les interactions photonucléaires au sein de la gerbe électromagnétique tendent à restreindre la portée de ces gerbes.

Nous avons étudié par le biais de simulations le développement de telles gerbes afin de quantifier les contributions de l'effet LPM et des interactions photonucléaires. Une chaîne de simulation détaillée a été développée traitant la propagation et les interactions des neutrinos dans la roche, le développement de la gerbe dans la croûte terrestre puis dans l'atmosphère et enfin la réponse du réseau de surface à ce type d'évènement. Cet outil permet de caractériser le signal dans le détecteur, de déterminer la sensibilité de l'observatoire à ces gerbes LPM et d'établir une limite sur le flux de neutrinos électroniques d'ultra haute énergie. Ces travaux sont l'objet d'un travail de thèse et sont en cours de publication.

Les interactions hadroniques

Les expériences détectant les RCUHE, telle l'expérience Pierre Auger, permettent d'étudier les interactions hadroniques aux énergies extrêmes. Les nombreuses analyses et les résultats importants publiés récemment par la *5 Landau Pomeranchuk Migdal*

collaboration Pierre Auger démontrent le riche potentiel en termes de physique des interactions fondamentales. La tâche d'analyse au sein de laquelle ces études sont menées est coordonnée par un des membres du groupe du LPSC.

Citons par exemple, l'exploitation de la mesure de profondeur du maximum de développement des gerbes mesurées par les télescopes de fluorescence dont la queue de distribution permet de mesurer la profondeur d'interaction dans l'atmosphère et de déduire une valeur précise et fiable de la section efficace proton-air à 57 TeV dans le centre de masse. Ce résultat est particulièrement important car il coïncide avec les premières mesures de sections efficaces faites au LHC environ 8 fois plus bas en énergie. Citons encore plusieurs analyses suivant des approches très différentes qui concordent toutes sur le fait que les modèles hadroniques actuels sont incapables de prédire correctement l'abondance de la composante muonique dans les gerbes à UHE. Le déficit constaté est de presque un facteur deux. Ce résultat ne met pas en péril les autres résultats publiés par la collaboration Auger car les effets sur la modélisation Monte-Carlo n'interviennent qu'au second ordre, par exemple dans la détermination de l'énergie. Par contre, ce résultat démontre clairement qu'il n'est pas évident d'extrapoler le comportement des phénomènes physiques sur plusieurs décades en énergie sans un certain risque de se tromper, et que nombre de modèles hadroniques doivent être amendés.

Extension et amélioration: EASIER

Les motivations

Les instruments actuels tels ceux qui sont utilisés par l'Observatoire Pierre Auger observent les gerbes en détectant les particules arrivant au sol et en détectant la lumière de fluorescence qu'elles produisent dans l'atmosphère. Ces deux mesures sont limitées, l'une par la difficulté de distinguer les différentes composantes de la gerbe et de remonter à son développement, l'autre par un faible cycle utile d'observation de $\sim 13\%$ (les nuits claires et sans lune). Or, les résultats récents de l'Observatoire Pierre Auger montrent que c'est dans un domaine d'énergie situé au-delà de quelques 10^{19} eV que l'univers apparaît anisotrope et que l'on observe des corrélations entre directions d'arrivée des RCUHE et certaines régions du ciel correspondant à des objets astrophysiques particuliers. Par ailleurs, les mesures de la position du maximum de développement des gerbes (X_{\max}) et de la variation de cette position d'une gerbe à l'autre ($V[X_{\max}]$) faites à partir des télescopes de fluorescence suggère une composition très lourde des rayons cosmiques entre 40 et 50 EeV. Ce résultat, s'il est extrapolable à plus haute énergie, et si les modèles d'interactions permettant de passer de la mesure de X_{\max} ou de $V[X_{\max}]$ à la composition sont fiables, semble incompatible avec l'existence d'une anisotropie visible à haute énergie pour les valeurs communément admises du champ magnétique galactique. Cependant certaines hypothèses peuvent être relâchées, comme les modèles d'interactions hadroniques utilisés qui sont des extrapolations de modèles à plus de 10 ou 100 fois l'énergie du LHC. Du point de vue expérimental, il est donc crucial de mesurer la composition au-delà de 50 EeV. Malheureusement cette mesure ne peut pas être faite avec les télescopes de fluorescence compte tenu de leur faible cycle utile et des coupures nécessaires pour s'affranchir des biais. Ainsi sur les 58 événements mesurés au-delà de 55 EeV, seuls 2 entrent dans la mesure de la composition.

L'objectif d'EASIER est de mesurer cette composition avec le réseau de surface en améliorant la capacité de celui-ci à distinguer les gerbes riches en muons, issues préférentiellement des noyaux lourds, de celles moins riches, issues des protons. L'accès à une nouvelle observable est rendue possible grâce aux développements récents de la détection de l'émission radio des gerbes atmosphériques, en particulier ceux obtenus avec l'expérience CODALEMA⁶ à laquelle le groupe a participé jusqu'en 2009. L'ajout d'antennes radio associées à chaque cuve Cherenkov, devrait permettre de mesurer, dans chacune d'elles, la fraction du signal mesuré due à la composante électromagnétique et par soustraction, la fraction du signal due à la composante muonique. La normalisation de ces deux composantes est un indicateur de la composition du primaire.

EASIER fait partie des améliorations de l'Observatoire Pierre Auger acceptées par la collaboration, et à laquelle nous travaillons en collaboration avec deux groupes français du LPNHE et de l'IPNO.

Le dispositif expérimental

Le principe du détecteur EASIER est d'intégrer en mode esclave la détection d'antennes aux cuves du réseau de surface de l'Observatoire Pierre Auger en utilisant les systèmes de déclenchement, de synchronisation temporelle et d'alimentation électrique des cuves. Pour les premiers tests, EASIER utilise deux hexagones du détecteur de surface. L'un est équipé avec sept antennes détectant les ondes radio dans le domaine du MHz, et l'autre avec sept antennes sensibles dans le domaine du GHz. Dans la gamme du MHz (30 à 80 MHz), les antennes utilisées sont identiques aux dipôles actifs utilisés sur l'expérience CODALEMA et développés par SUBATECH. Dans la gamme de fréquence entre 3 et 5 GHz, les antennes sont de type commercial et habituellement utilisées pour la réception de la télévision satellite dans la bande C (3,4 à 4,2 GHz). Les caractéristiques des antennes ont été simulées avec le logiciel HFSS⁷, et comparées à des mesures réalisées en chambre anéchoïde à l'ESISAR⁸. Pour chaque type d'antenne installé sur

⁶ *COSMIC RAY DETECTION ARRAY WITH LOGARITHMIC ELECTROMAGNETIC ANTENNAS*

⁷ *HIGH FREQUENCY STRUCTURE SIMULATOR*

⁸ *ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES SYSTÈMES AVANCÉS ET RÉSEAUX, VALENCE, GROUPE GRENOBLE INP*

les cuves, le signal a été adapté grâce à un boîtier électronique spécifique développé par le LPNHE afin de le relier au FADC normalement utilisé par l'anode d'un des trois photomultiplicateurs de la cuve. L'installation des antennes, à laquelle notre groupe et le SDI ont pris part, a eu lieu en mars 2011 et la prise de données a été immédiate.

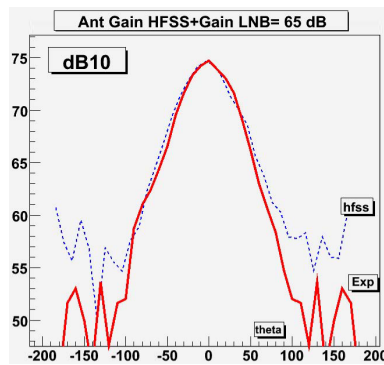


Fig. 2: Évolution du gain de l'antenne GHz: comparaison de la réponse simulée (courbe bleue) aux mesures en chambre anéchoïde (courbe rouge)

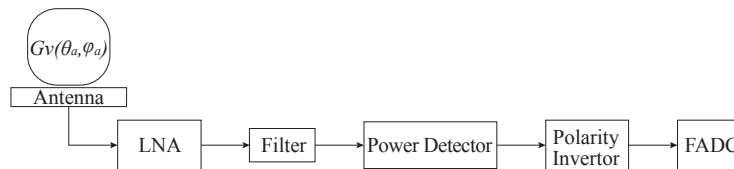


Fig. 3: Schéma de la chaîne électronique utilisée pour adapter le signal d'antenne au FADC habituellement utilisé par l'anode d'un des 3 photomultiplicateurs de la cuve.



Fig. 4: Installation d'antennes sur les cuves Cherenkov du réseau au sol de l'Observatoire Pierre Auger, à gauche dans le domaine du MHz (30 à 80 MHz) et à droite dans le domaine du GHz (3 à 5 GHz).

Les premiers résultats

Les signaux d'antenne sont enregistrés lorsqu'une cuve de l'hexagone appartient à un événement ayant déclenché le détecteur de surface. L'énergie, la direction et la position du cœur de la gerbe sont obtenues par les codes de reconstruction standard de la collaboration.

L'analyse des signaux radio a rapidement permis de mettre en évidence l'émission dans la bande VHF d'ondes électromagnétiques par les gerbes atmosphériques, phénomène qui avait déjà été observé par d'autres expériences telle que CODALEMA. Plus de quarante événements en coïncidence avec le réseau au sol ont ainsi pu être clairement identifiés. L'asymétrie nord-sud compatible avec une émission géosynchrotron a été mise en évidence et l'extension latérale du signal a été estimée à environ 100 m du cœur de gerbe. L'étude de l'influence de la cuve et de son environnement sur les lobes de l'antenne a montré qu'il s'agissait d'un effet important à prendre en compte et si possible à corriger pour le futur. L'étalonnage précis du système est en cours et des pistes d'amélioration sont à l'étude. Néanmoins EASIER a déjà montré sa capacité à mesurer le signal radio émis par les gerbes avec une bonne efficacité pour des énergies au-delà de 1 EeV et fournit ainsi un moyen très simple d'étudier l'émission radio à grande distance et à haute énergie.

Le signal produit par une gerbe atmosphérique dans le domaine du GHz n'avait quant à lui jamais été détecté auparavant. Trois mois après son installation EASIER a enregistré pour la première fois un signal GHz 14 fois supérieur aux fluctuations de la ligne de base en coincidence claire avec le signal produit par les particules dans la cuve. L'énergie de la gerbe était de 14 EeV et son angle zénithal de 30° , l'antenne était située à 136 m du cœur de la gerbe. La détection d'un seul événement ne permet pas de déterminer l'origine exacte de ce signal, mais nos simulations permettent d'envisager qu'il s'agisse de l'émission de Bremsstrahlung moléculaire, qui est isotrope et insensible au champ magnétique terrestre. La mesure d'un nombre plus important d'événements est donc cruciale pour explorer cette voie. Sachant que le taux de gerbes atmosphériques dont le cœur est situé à moins de 150 m d'une de nos antennes et dont l'énergie est supérieure à 15 EeV n'est que de 1 tous les 20 ans, il est envisagé d'étendre EASIER sur 61 cuves supplémentaires dès novembre 2011.

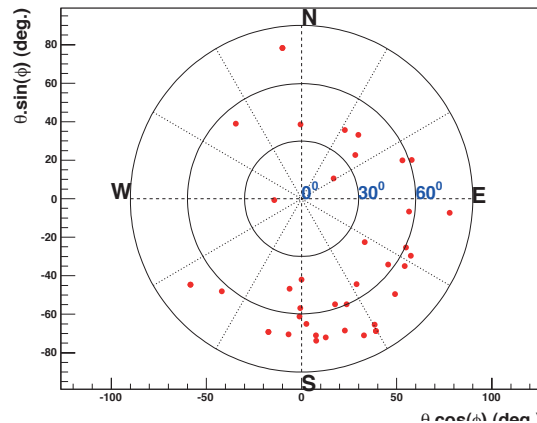


Fig. 5: Directions d'arrivée des RCUHE pour lesquels EASIER a détecté l'émission radio dans la bande VHF en coincidence avec le signal des particules du réseau au sol de l'Observatoire Pierre Auger.

NOY: Un télescope à neutrinos cosmiques

Le principe

L'observation des neutrinos effleurant la Terre a été proposée comme une méthode très sensible pour la détection des neutrinos tau cosmiques d'ultra haute énergie. Alors qu'ils peuvent traverser l'atmosphère aisément, les neutrinos interagissent dans la roche et produisent des leptons. Le lepton tau se propage dans la roche, s'échappe et induit en se désintégrant une gerbe dans l'air. Un détecteur capable de détecter une gerbe horizontale émergeant de la roche permet donc de réaliser une expérience d'apparition (ν_τ, τ). L'observation d'un très grand volume de cible couplée à une grande efficacité de détection est nécessaire pour surmonter le flux très faible de neutrinos d'origine cosmique. Le télescope NOY propose une telle détection grâce à une installation dans une configuration montagne-vallée spécifique.

Le détecteur

Afin de détecter des gerbes atmosphériques horizontales, le principe d'un petit réseau de cinq détecteurs de particules déployés sur une centaine de mètres au sol a été retenu. Ce type de détecteur répond aux exigences de grand cycle utile de fonctionnement, de robustesse vis-à-vis des conditions climatiques et enfin d'absence de bruit de fond naturel ou anthropique dans le champ de vue. Les différences de temps d'arrivée du front de gerbe sur les détecteurs permettent de reconstituer la direction incidente. La séparation des gerbes quasi horizontales émergentes de la montagne des gerbes purement atmosphériques à faible élévation nécessite une bonne résolution angulaire. Celle-ci impose deux conditions essentielles: le plan de détection doit avoir une composante verticale et la résolution en temps doit être la meilleure possible.

Un réseau de 5 stations a été déployé en croix à 1500 mètres d'altitude sur une pente inclinée à 30 degrés, dans la Réserve Naturelle du Parc Régional de Chartreuse à proximité de Grenoble. Il fait face à la vallée profonde du Grésivaudan et pointe au Sud-Sud-Est vers les massifs de Belledonne et de l'Oisans hauts de plus de 3000 mètres. Une cartographie détaillée du site et des massifs environnant a été utilisée pour estimer la sensibilité du détecteur aux neutrinos de différentes énergies. Une simulation complète permet de suivre le neutrino depuis la source, à travers la terre jusqu'à la gerbe horizontale produite dans la vallée lors de la désintégration du lepton tau. Une fonction d'exposition a pu en être extraite montrant un maximum vers quelques 10^{14} cm².sr.s pour des énergies de neutrino entre 10^{17} et 10^{18} eV.

Détection et Acquisition de données.

Chaque station est constituée d'un scintillateur plastique observé par 2 photomultiplicateurs. Les 5 stations sont reliées par câble à une station centrale contenant le système d'acquisition.

Le système d'acquisition de données embarqué CODALPS a été étudié et développé au LPSC. Il inclut sur une seule carte toutes les fonctions requises avec une consommation inférieure à 15 Watts permettant de fonctionner en mode isolé grâce à une alimentation par panneaux solaires. La carte contient 8 canaux de convertisseurs analogique-numérique de 12 bits échantillonnant à 250 Ms/s. Ils sont pilotés par un FPGA XilinX VIRTEX 4 FX20 à 250 MHz ainsi qu'un cœur Power PC opérant sous micro-Linux. Le trigger est programmable à distance et les fonctionnalités d'entrée-sortie sont gérées par le PC embarqué qui gère aussi l'écriture des données. Un port Ethernet connecté à un modem commercial via GPRS (3G) permet le transfert des données et le pilotage à distance. Le PC embarqué contrôle également un module 8 voies d'alimentation haute tension pour les photomultiplicateurs.



Fig. 6: Station centrale du réseau NOY installée dans le parc régional de Chartreuse.

Pour en savoir plus

Site de l'Observatoire Pierre Auger: <http://www.auger.org/index.html>

Site du groupe Auger au LPSC: <http://lpsc.in2p3.fr/DRAC/>

Sur la recherche de neutrinos UHE

Search for ultrahigh energy neutrinos in highly inclined events at the Pierre Auger Observatory. The Pierre Auger collaboration, Physical Review D 84, 122005 (2011).

On the influence of photonuclear effect on electron neutrino induced electromagnetic cascades under LPM regime in standard rock. M. Tartare, D. Lebrun, F. Montanet, en préparation.

Sur les interactions hadroniques et la composition des RCUHE

The Pierre Auger collaboration, Contributions to the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 2011 Arxiv:1107,4804.

Sur le suivi, le contrôle et la maintenance de l'observatoire

The Pierre Auger collaboration, Contributions to the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 2011 Arxiv:1107,4806.

Sur les développements et améliorations, notamment sur le projet EASIER

The Pierre Auger collaboration, Contributions to the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, China, August 2011 Arxiv:1107,4807.

Sur le télescope neutrino NOY

NOY: a neutrino observatory network project based on a stand alone air shower detector arrays.

F. Montanet, D. Lebrun, J. Chauvin, E. Lagorio, P. Stassi, Astrophysics Space Science Transactions, 7, 369-372, 2011.

Étude du rayonnement fossile avec Planck

L. Fauvet, D. Girard, S. Hildebrandt, G. Hurier, F. Kharab, J. F. Macías-Pérez, L. Perotto, C. Renault, L. Sanselme, D. Santos

Service Détecteurs et Instrumentation

Service Électronique

Service Études et Réalisations Mécaniques

Service Informatique

F.-X. Désert, LAOG, France

Planck is the first European Spatial Agency (ESA) mission dedicated to the measurement of the Cosmic Microwave Background (CMB) radiation. Since the launch in 2009, May 14th, Planck has collected data which meet or surpass the required quality. First results of astrophysical interest have been published in early 2011 along with the delivery of the compact source catalogue. Then efforts have been put on data analysis and exploitation for cosmology. Planck will provide the “definitive” map of the relic radiation in temperature and the first precise full-sky maps in polarization.

On the instrumental side, the laboratory had responsibilities on the on-board hardware related to the Sorption Cooler Electronics (SCE) and the Dilution Cooler Electronics (DCE), in the on-board software controlling the SCE, in the interface that receives the telemetry and sends the commands to the SCE. On the data analysis side, the LPSC has the responsibility of the processing of the HFI timeline analysis and a deep contribution to the measurement of the gravitational lensing of the CMB by the line-of-sight matter. We are also actively involved in several Planck science projects and in the preparation of the next generation of experiment targeted to the CMB polarization measure.

Contexte scientifique

Le fond diffus cosmologique

Le rayonnement fossile à 3 K (ou CMB pour Cosmic Microwave Background) est la première image de l'univers qui nous soit accessible. En effet, il correspond à la surface de dernière diffusion, lorsque l'univers s'était suffisamment refroidi pour que les premiers atomes se forment et que les photons, ne pouvant plus agir avec les électrons, se propagent librement jusqu'à nous. C'est une observable fondamentale pour l'élaboration du modèle cosmologique actuel – corroboré par l'ensemble des observations dans ses grandes lignes, dans lequel les fluctuations primordiales générées par l'inflation environ 10^{-35} seconde après le Big-Bang auraient évolué par effondrement gravitationnel dans un univers en expansion pour donner naissance aux grandes structures de l'univers (galaxies, amas et super amas de galaxies). L'étude de la carte du CMB sur l'ensemble de la voûte céleste donne accès au spectre de puissance des fluctuations de température moins de 400 000 ans après la période d'inflation. Ce spectre contient donc l'information sur le spectre initial des fluctuations ainsi que sur les propriétés de l'univers dans lequel elles ont évolué. Par ailleurs, le rayonnement fossile, polarisé à 10%, recèle encore deux observables supplémentaires: le mode E de polarisation, essentiel pour l'étude de la réionisation de l'univers notamment, et le mode B de polarisation, généré par les ondes gravitationnelles produites à l'issue de la période inflationnaire. Combinées avec d'autres mesures de la distribution des galaxies ou de la vitesse d'expansion, les observations du CMB permettent de contraindre l'ensemble des paramètres du modèle cosmologique actuel.

L'expérience satellite Planck

Après COBE et WMAP, Planck est la troisième génération de satellite dédié à l'observation du CMB, et le premier mis en œuvre par l'agence spatiale européenne. L'objectif de Planck est la mesure définitive des anisotropies primaires en température et une première mesure exploitable pour la cosmologie du mode E de polarisation. La mesure du mode B de polarisation sera vraisemblablement l'enjeu de la quatrième génération de satellite, d'ores et déjà à l'étude. À partir de l'étude statistique des observables, les paramètres cosmologiques tels que la géométrie et le contenu de l'Univers mais également la dynamique de la période d'inflation devraient être estimés précisément, avec des erreurs de un à quelques pour-cent selon ces paramètres. Cette précision inégalée permettra également de tester des modèles de nouvelle physique qui devront faire face à de très fortes contraintes observationnelles. La qualité des cartes fournies, tant en terme de sensibilité que de résolution angulaire, permettra également une reconstruction des anisotropies dites secondaires, car affectant le CMB après son émission. Ainsi, Planck fournira la première reconstruction aux plus grandes échelles angulaires de l'effet de lentille gravitationnelle que les grandes structures impriment sur le CMB, lui conférant ainsi une sensibilité à l'échelle absolue de masse des neutrinos. Planck détectera également un millier d'amas et super amas de galaxies grâce à leur interaction avec le rayonnement fossile par effet Sunyev-Zeldovich (SZ), ouvrant ainsi une nouvelle voie pour l'étude statistique des grandes structures.

Planck est une collaboration internationale organisée autour des deux instruments (LFI et HFI pour Low et High Frequency Instrument), regroupant environ 400 chercheurs, dans une dizaine de pays en Europe et en Amérique, pour un budget d'environ 550 M€. En France, le LPSC a des responsabilités « clefs » tant au niveau de l'instrument que de l'analyse de données. La période 2010-2011 a été marquée par le renouvellement programmé des électroniques de contrôle de 2 des 3 étages thermiques permettant un fonctionnement de l'instrument à 0,1 K et par un intense investissement dans l'analyse des données. Ainsi le groupe a fortement contribué à l'obtention des premières cartes qui ont servi à la publication des premiers résultats d'intérêt astrophysique en janvier 2011, tout en préparant les analyses ultérieures dédiées à la cosmologie, notamment l'exploitation des données polarisées et la reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle. En parallèle, le groupe est impliqué dans un projet d'expérience CMB post-Planck.

Analyse et exploitation des données de Planck

Contribution aux premiers résultats

Le plan focal de l'instrument HFI contient 52 bolomètres sensibles à la température et à la polarisation. Avant de pouvoir projeter ces données sur une carte, il est indispensable de séparer l'information venant effectivement du ciel des perturbations issues de l'instrument lui-même. Celles-ci peuvent venir de l'interaction d'un rayon cosmique avec le bolomètre, d'une fluctuation de l'émission thermique d'un élément du système optique (miroirs, cornets, filtres, bolomètres), d'une variation de la réponse du détecteur ou du bruit parasite produit par la machine cryogénique à 4 K. Notre groupe a la responsabilité du développement et de l'intégration des outils nécessaires à cette étape. Ce travail se fait de façon itérative et en relation avec les étapes ultérieures de l'analyse, notamment la fabrication des cartes. Il s'appuie sur de nombreuses études visant à comprendre en détail le fonctionnement du détecteur, que ce soit au niveau de l'interaction avec le rayonnement cosmique (thèse de D. Girard) ou de la modélisation de la réponse en temps des bolomètres (post-doc de S. Hildebrandt) par exemple. Les cartes obtenues (Fig. 1) ont été à la base de 23 articles publiés en 2011.

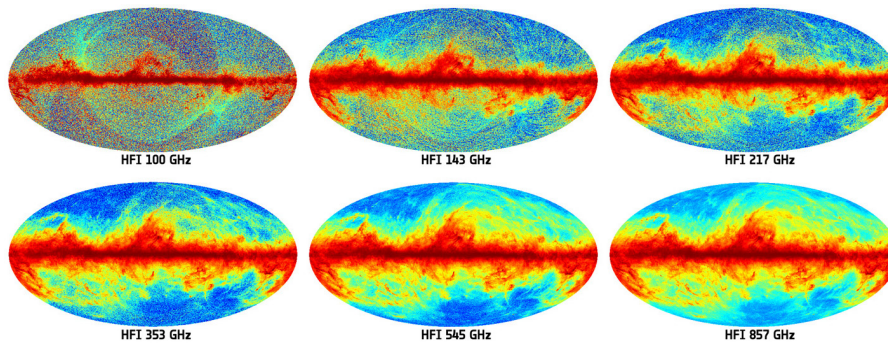


Fig. 1: Cartes en coordonnées galactiques aux 6 fréquences de HFI, une fois la contribution du rayonnement fossile soustraite. Credits ESA – consortia HFI/LFI

Préparation de la mesure de la polarisation: modélisation des émissions galactiques

La détection du CMB avec Planck passe par une compréhension des émissions d'avant-plan telles que l'émission thermique de la poussière galactique et le rayonnement synchrotron. En ce qui concerne la température, de nombreuses études ont été réalisées. En revanche, peu d'informations sont actuellement disponibles sur les émissions d'avant-plan polarisées. Au sein de groupes de travail de Planck (WG2 et 7), nous avons développé des modèles d'émissions polarisées de la poussière et du synchrotron, basés sur une modélisation tridimensionnelle du champ magnétique galactique et des densités d'électrons relativistes et de poussière dans la Galaxie. Ensuite, par une procédure d'intégration sur la ligne de visée, ces modèles nous permettent de construire des cartes de référence de ces émissions et ce, aussi bien en température qu'en polarisation. Les cartes ainsi obtenues sont utilisées aussi bien pour affiner notre compréhension des processus physiques d'émission que pour en générer des simulations réalistes, nécessaires pour tester les algorithmes de séparation des composantes.

Effet de lentille gravitationnelle sur le rayonnement fossile

Après la surface de dernière diffusion, les photons du CMB interagissent faiblement de manière gravitationnelle avec la matière traversée le long de la ligne de visée. Ainsi, par effet de lentille gravitationnelle, les grandes structures impriment un champ de déflexion sur les anisotropies de température et la polarisation du CMB, laissant plusieurs signatures remarquables. L'effet de lentille induit un mode B secondaire de polarisation qui domine le mode B primaire, généré par les ondes gravitationnelles produites lors de la phase inflationnaire, et qu'il va donc être nécessaire de soustraire pour contraindre les scénarii d'inflation. D'autre part, il perturbe les propriétés statistiques des anisotropies de température et de la polarisation, introduisant des non-gaussianités dans les cartes du CMB.

La qualité des cartes fournies par Planck permet d'accéder aux propriétés statistiques des observables au delà du spectre de puissance angulaire, ce qui rend possible la reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle et la mesure du spectre de puissance de la déflexion (voir Fig. 2) Une telle mesure est souhaitable, non seulement parce qu'elle permet de corriger un effet qui, sinon, serait une source de biais non compatible avec les exigences de la cosmologie de précision, mais aussi parce qu'elle fournit une précieuse sonde cosmologique. En effet, la reconstruction de l'effet de lentille sur le CMB est une opportunité unique dans les prochaines années, d'accéder à la distribution de masse de l'univers, de la surface de dernière diffusion jusqu'à nous, et ce avec une sensibilité maximale à des décalages vers le rouge de l'ordre de 3 et pour des structures évoluant encore dans un régime linéaire bien modélisable. Ces caractéristiques en font une sonde bien adaptée pour contraindre l'échelle absolue de la masse des neutrinos.

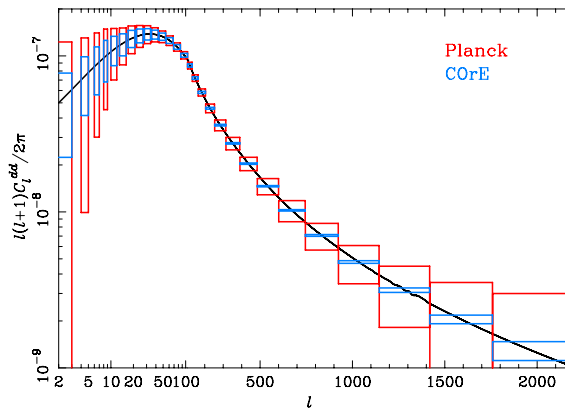


Fig. 2 : Prédiction de la mesure du spectre de puissance angulaire de la déflexion pour Planck (en rouge) et pour le projet de satellite COre (en bleu). Une telle mesure améliorerait les contraintes que Planck imposera sur certains paramètres cosmologiques, telle la masse des neutrinos, d'un facteur 3. Crédits COre collab.

Le groupe Planck du LPSC possède une expertise des outils statistiques complexes nécessaires à la reconstruction de l'effet de lentille et a fortement participé au développement d'une chaîne d'analyse s'appliquant aux cartes des anisotropies de température par fréquence d'observation et ce en collaboration avec les équipes du Laboratoire de l'accélérateur linéaire et du Service d'astrophysique du CEA. Dans ce cadre, nous avons été les premiers à obtenir des résultats très prometteurs dès début 2010. Puis, nous avons dévolu nos efforts à améliorer le contrôle des effets systématiques, point crucial de ce type d'analyse. La reconstruction de l'effet de lentille nourrira plusieurs projets centraux, tel que l'estimation des paramètres cosmologiques avec Planck seul, dans lesquels le LPSC est naturellement fortement impliqué.

Phase de pre-heating

Une étude sur le « pre-heating » est développée en collaboration avec Mar Bastero-Gil, de l'Université de Grenade (Espagne). Cette phase correspond à la période de transition entre la fin de l'inflation et l'ère du rayonnement. Lors de cette transition, le champ scalaire responsable de l'inflation transforme son énergie en rayonnement et matière. Une publication avait déjà présenté les premiers résultats en 2007, sur les perturbations scalaires de la métrique pendant cette période pré-baryogénèse. En 2009, nous avons réussi un calcul montrant aussi l'effet des perturbations tensorielles sur cette période, qui a donné lieu à une seconde publication.

L'après Planck : vers une expérience dédiée à la mesure de la polarisation

Après Planck, toute l'information cosmologique que recèle les anisotropies primaires de température aura été exploitée. Les prochains grands enjeux de l'étude du rayonnement fossile résideront dans l'exploitation des anisotropies secondaires – effet Sunyaev-Zeldovitch, effet de lentille gravitationnelle, etc. – et dans la mesure de précision de la polarisation avec comme objectif principal la détection du mode B primordial de la polarisation, observable privilégiée pour l'étude des origines des structures de l'univers. C'est autour de ce double programme scientifique que s'est développée la proposition de quatrième génération de satellite COre (Cosmic Origins Explorer) en réponse à l'appel d'offre Cosmic Vision 2015-2025 de l'ESA. Le niveau de sensibilité demandée aux détecteurs qui équiperont COre requièrera un saut technologique que suscite d'ors et déjà une intense activité de R&D au sein de la communauté CMB. Fort de son expérience acquise dans Archeops et Planck et de son implication à la fois dans le projet R&D NIKA et dans le comité scientifique de COre, le LPSC est très bien positionné pour aborder l'avenir du CMB.

Le projet de détecteur NIKA

Dans le cadre de la préparation de la nouvelle génération d'instruments pour la mesure de la polarisation du CMB, nous menons en France une étude R&D pour la construction d'une matrice de quelques milliers de détecteurs sensibles à la polarisation (en comparaison, le plan focal de Planck n'est composé que de 54 bolomètres). Actuellement, deux technologies sont considérées: les bolomètres et les KIDs (Kinetic Inductance Detectors).

Notre équipe participe activement à cette thématique. Tout d'abord nous avons construit avec l'aide du service mécanique du laboratoire un interféromètre de type Martin-Peuplet qui a été aussitôt installé dans le banc de test existant à l'Institut Néel. Cet interféromètre permet de reconstruire la réponse en fréquence et en polarisation de chaque détecteur d'une matrice en le couplant à une caméra (ensemble cryostat à 100 mK plus matrice de bolomètres) sensible dans le domaine millimétrique. En outre, le LPSC s'est fortement impliqué dans le design des matrices de bolomètres à antennes, notamment en ce qui concerne leur réponse à un signal polarisé. Ce travail a été effectué avec le logiciel HFSS qui permet d'étudier la transmission et la réflexion d'une onde électromagnétique dans la matrice de bolomètres.

Plus récemment, notre équipe s'est fortement impliquée dans le développement de l'instrument NIKA, équipé de deux matrices de KIDs comprenant 300 détecteurs chacune. Nous avons pris en charge la construction de l'électronique associée à des matrices de type KIDs avec comme ambition le multiplexage massif de la lecture des données. Ce travail est effectué au sein du service d'électronique du laboratoire. Un premier prototype de cette électronique a été récemment réalisé pour permettre la lecture simultanée d'une centaine de détecteurs (voir Fig. 3). En outre, nous participons aux campagnes de test et d'observation de NIKA avec le télescope de 30 m de l'IRAM à Grenade.

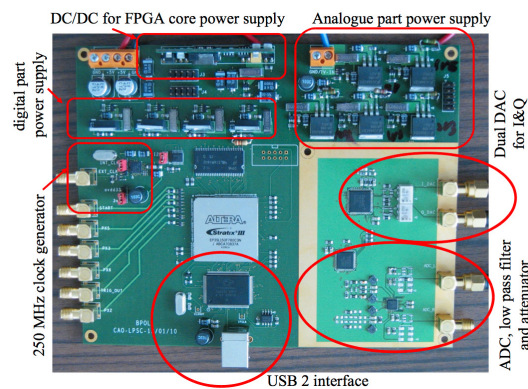


Fig. 3: Photographie du prototype de carte électronique de multiplexage fréquentiel permettant la lecture simultanée d'une centaine de KIDs. Crédit O. Bourrion et al., JINST, Vol. 6 (2011).

Perspectives spatiales

Le satellite CORe, proposé à l'ESA en 2010 dans le cadre de Cosmic Vision 2015-2025, fournira des cartes complètes de la polarisation du CMB, dans 15 bandes de fréquence d'observation et ce, avec une sensibilité 10 à 30 fois meilleure que Planck (selon les canaux de fréquence). Ces caractéristiques devraient permettre une détection des ondes gravitationnelles générées lors de la période d'inflation même dans des cas défavorables envisagés par la théorie (capacité à détecter les modes tensoriels environ 100 fois meilleure que celle de Planck). CORe sera également une expérience idéale pour la reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle, permettant la mesure définitive du spectre de puissance de la déflexion créée par les grandes structures encore dans un régime linéaire de croissance. Une telle mesure fera de CORe une expérience autonome pour contraindre la masse absolue des neutrinos de façon compétitive par rapport aux expériences en laboratoire dédiées. Notre équipe a participé activement au travail de préparation et de rédaction de la proposition livrée à l'ESA, en particulier à la prédiction des contraintes sur la physique des neutrinos accessibles à CORe.

Pour en savoir plus

Cosmologie observationnelle avec le satellite PLANCK: modélisation des émissions galactiques polarisées, L. Fauvet, Thèse de l'Université J. Fourier (2010)

Cosmologie observationnelle avec le satellite Planck: extraction du signal astrophysique des données brutes de l'instrument HFI et étude de l'effet du rayonnement cosmique, D. Girard, Thèse de l'Université J. Fourier (2010)

Electronics and data acquisition demonstrator for a kinetic inductance camera, O. Bourrion et al., JINST, Vol. 6 (2011), <http://arxiv.org/abs/1102.1314>

A dual-band millimeter-wave kinetic inductance camera for the IRAM 30-m telescope, A. Monfardini et al., *Astrophysical Journal Supplement, Series*, Vol. 194 (2011), <http://arxiv.org/abs/1106.1376>

Planck Early Results: The High Frequency Instrument data processing, Planck Collab., <http://arxiv.org/abs/1101.2048>

Joint 3D modelling of the polarized Galactic synchrotron and thermal dust foreground diffuse emission, L. Fauvet et al., *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 526 (2011)

Planck Early Results: The High Frequency Instrument data processing, Planck Collab., <http://arxiv.org/abs/1101.2048>

Planck Early Results: First assessment of the High Frequency Instrument in-flight performance, Planck Collab., <http://arxiv.org/abs/1101.2039>

COrE (Cosmic Origins Explorer) A White Paper, COrE Collab., <http://arxiv.org/abs/1102.2181>

Le site Internet à destination du grand public <http://www.planck.fr>

Expérience LSST et activité théorique

A. Barrau, S. Beaumont, T. Cailleteau L. Derome, A. Gorecki
 Service Électronique
 Service Détecteurs et Instrumentation

The Large Synoptic Survey Telescope (LSST) is a major experiment devoted to the study of the Universe at large scales, in particular to understand the fundamental nature of dark energy. With a large mirror (8 meters) and huge camera (3 billions pixels) it should be operated from 2015 and will be the telescope with the highest "étendue" in the history of astronomy. The LPSC-Grenoble is responsible for the calibration bench of the integrated camera, ensures the technical coordination of LSST-France and participates in the manual filter changer and in BAO studies. In parallel, the group is involved in theoretical cosmology. We study cosmological consequences of Loop Quantum Gravity (LQG), in particular in the inflationary paradigm.

Participation au télescope LSST

Contexte général et enjeu scientifique

L'expérience LSST (Large Synoptic Survey Telescope) entend apporter des éléments de réponse décisifs à l'une des énigmes majeures de la physique contemporaine: pourquoi l'expansion de l'Univers accélère-t-elle? L'énergie, dite «noire», à l'origine de cette accélération est le contenu dominant de l'Univers et pourrait être associée aux fluctuations quantiques du vide ou à une théorie d'unification des forces fondamentales. Il s'agit donc d'un enjeu à l'intersection de l'astronomie, de la physique des particules et de la cosmologie. Le télescope LSST permettra de sonder l'énergie noire par plusieurs approches complémentaires: oscillations acoustiques de baryons, lentilles gravitationnelles faibles et supernovae.

LSST est une large collaboration internationale menée par les États-Unis. La collaboration LSST-France repose sur 6 laboratoires de l'IN2P3.

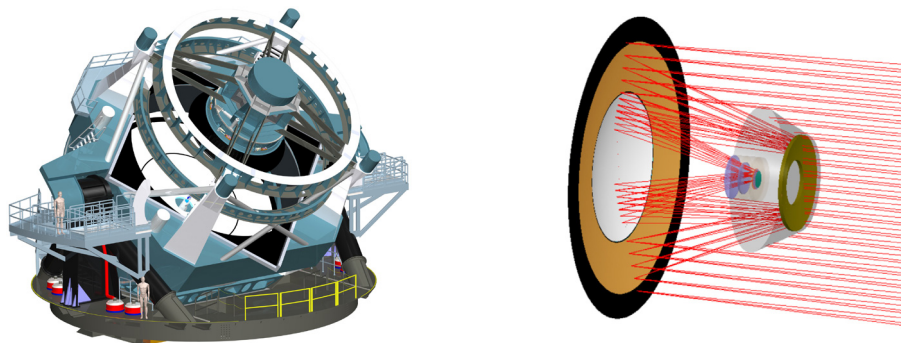


Fig. 1: Gauche: Vue d'artiste du télescope LSST. Droite: Propagation e la lumière dans LSST.

Banc d'étalonnage de la caméra de LSST

Le LPSC a pris la responsabilité de la conception du banc d'étalonnage de la caméra intégrée (CCOB) de LSST. Ce banc devra permettre le commissioning de cette caméra qui sera la plus complexe construite jusqu'alors pour un télescope. Il s'agira de mesurer l'ensemble des paramètres optiques et électroniques à l'aide d'un banc conçu à cet effet qui fonctionnera suivant deux modes différents. Il sera ainsi possible d'étalonner la réponse des CCD, c'est à dire de réaliser un champ plat, d'évaluer la lumière diffusée dans la caméra ainsi que les effets d'angle d'incidence et de longueur d'onde. Ce banc a vocation à être utilisé à SLAC et éventuellement dupliqué sur le site d'observation au Chili.

Nous avons réalisé une simulation qui a permis de montrer que le CCOB permettrait également de mesurer l'ajustement mécanique de la caméra. Notre étude a établi que toute rotation ou translation d'un élément optique au-delà du cahier des charges serait mise en évidence.

En parallèle, un prototype est développé dans une salle propre du LPSC. Toute la chaîne d'acquisition du CCD a été mise en place et fonctionne. Les caractéristiques du faisceau ont été mesurées avec précision et les *drivers* des différents instruments sont en cours de développement.

Simulations de la caméra de LSST

Les premières études portant sur les images «fantômes» dans la caméra de LSST (dues aux réflexions internes dans le correcteur de champ) ont été largement développées. Leur influence sur le champ plat global du télescope a été établie et des moyens de corrections ont été proposés.

Coordination technique LSST-France et changeur manuel de filtres

C. Vescovi (service d'électronique du LPSC) continue d'assurer la coordination technique nationale de LSST.

Dans le cadre du système d'échangeur de filtres caméra, le LPSC a pris la responsabilité de la fourniture de tous les éléments nécessaires à la construction et au fonctionnement du système «Chargeur de filtres». Il a également en charge la gestion de projet de ce système.

Le chargeur de filtres doit permettre le transport des filtres caméra (\varnothing 800 mm), sous atmosphère contrôlée (classe 100 000), depuis leur lieu de stockage jusqu'à sa connexion avec la caméra. L'étude d'un prototype de chargeur, devant être testé en 2013 sur le banc de test de l'échangeur, a débuté en septembre 2011. 2 exemplaires finaux devront être fournis pour leur utilisation sur le site de Cerro Pachón au Chili à partir de 2018.

Étude des oscillations acoustiques baryoniques

La collaboration avec le LAL sur l'étude des oscillations acoustiques de baryons a donné ses premiers résultats. Nous avons développé une méthode complète de reconstruction des *redshifts* photométriques. Celle-ci a été validée sur des données réelles. Nous avons pu reproduire les résultats du *science book* de LSST et montrer que suivant des hypothèses réalistes, la reconstruction des décalages vers le rouge devrait atteindre la précision escomptée. Ces techniques ont été appliquées à la simulation d'un vaste catalogue de galaxies pour évaluer la précision résultante sur les paramètres cosmologiques. Les effets d'absorption et la grande diversité des spectres de galaxies sont pris en compte.

Cosmologie théorique

Le groupe est impliqué dans différentes études autour de la gravitation quantique à boucles (LQG). Il s'agit d'une tentative de quantification non perturbative et invariante de fond de équations d'Einstein. La LQG ne nécessite aucune hypothèse révolutionnaire supplémentaire (ni supersymétrie, ni extra-dimensions): elle applique un schéma de quantification de «type Dirac» à la relativité générale réécrite comme une théorie de jauge. Aujourd'hui, le fait que les approches covariantes, canoniques et géométriques convergent vers la même théorie LQG constitue une indication forte en faveur de sa crédibilité. Elle peut, en particulier, être développée dans le formalisme mathématique très cohérent des réseaux (mousses) de spin.

Nous nous intéressons aux conséquences cosmologiques de la LQG. L'intérêt principal de ce modèle est que la singularité du Big Bang disparaît: elle est remplacée par un «grand rebond» (Big Bounce) qui régularise l'ensemble de la description cosmologique. Nous avons d'abord montré que ce modèle prédit presque «automatiquement» l'inflation. De façon remarquable, cet accroissement exponentiel du facteur d'échelle de l'Univers, nécessaire pour résoudre les paradoxes cosmologiques mais usuellement ajoutée «à la main», apparaît ici comme pratiquement inévitable. Ensuite, nous avons étudié les éventuelles conséquences observationnelles de ce modèle via la production d'ondes gravitationnelles. Nous avons ainsi établi que le spectre tensoriel primordial des perturbations cosmologiques était modifié, pouvant ainsi laisser une empreinte mesurable.

Enfin, au niveau plus mathématique, nous avons construit une algèbre close (c'est à dire telle que les vecteurs d'évolution restent colinéaires aux hypersurfaces de contraintes) pour les perturbations vectorielles et scalaires en cosmologie quantique. Celles-ci requièrent l'introduction de contre-termes qui lavent les artefacts des corrections quantiques à la limite classique. Les perturbations cosmologiques ont été réécrites dans le formalisme invariant de jauge de Mukhanov. Dans le plus long terme, ces calculs permettront d'évaluer les conséquences sur le mode «température» du rayonnement cosmologique fossile (CMB).

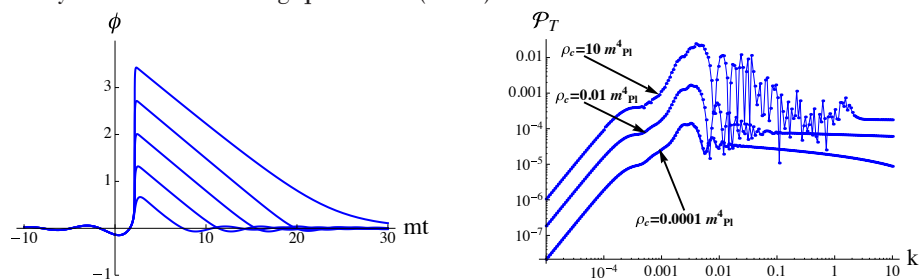


Fig. 2: Gauche: évolution du champ scalaire massif en fonction du temps dans un modèle de Big Bounce issu de la cosmologie quantique à boucles. Automatiquement apparaît une phase de «slow roll» générant l'inflation. Droite: spectre tensoriel primordial résultant pour différentes valeurs de la densité critique.

Détection directionnelle de matière sombre avec MIMAC

J. Billard, F. Mayet, D. Santos

O. Guillaudin, A. Pelissier, M. Heusch, Service Détecteurs et Instrumentation

J.-L. Bouly, O. Bourrion, G. Bosson, J.-P. Richer, J.-P. Scordilis, Service Électronique

C. Fourel, J.-C. Malacour, D. Fombaron, S. Roni, S. Roudier, Service Études et Réalisations Mécaniques

J. Angot, T. Lamy, P. Sole, P. Sortais, Service des Sources d'ions

MIMAC is a project of a large TPC dedicated to directional dark matter detection. This is a powerful search strategy which requires measuring both the energy and the 3D track of recoiling nuclei. Several topics are being developed: phenomenology of directional detection, to show what can be brought to the field of Dark Matter, R&D detector development, from electronics to full detector design, with the goal to build a CF₄ directional detector.

La détection directionnelle constitue l'une des stratégies de recherche de Matière Sombre galactique. L'idée est de profiter du mouvement du système solaire autour du centre galactique et à travers le halo de matière sombre. On observe ainsi un vent relatif de WIMP en provenance de la direction vers laquelle se dirige le système solaire (en l'occurrence vers la constellation du Cygne). Par conséquent, une expérience permettant de mesurer à la fois l'énergie et la direction des reculs nucléaires, devrait observer un excès d'événements dans cette direction, clairement discriminable du bruit de fond, isotrope dans le référentiel galactique.

Le projet MIMAC est une première étape vers la définition d'un grand détecteur directionnel pour la détection de matière sombre. Dans ce cadre, plusieurs axes de recherches sont développés.

Phénoménologie

Nous avons cherché à montrer l'intérêt et la complémentarité de la détection directionnelle par rapport aux stratégies de recherche actuelles (directe, indirecte, sur accélérateurs).

La différence entre le signal attendu pour les WIMPs et celui du bruit de fond permet dans un premier temps d'envisager une exclusion performante et ce même en présence d'un taux de bruit de fond résiduel important [1].

Il est cependant possible d'exploiter de manière plus originale cette différence. Pour ce faire, nous avons utilisé des méthodes statistiques dédiées pour montrer comment exploiter les futures données de la détection directionnelle. Pour ces études prospectives, on considère un détecteur CF₄ avec une exposition de 30 kg.an, qui est l'objectif de la collaboration MIMAC.

Pour des sections efficaces WIMP-nucléon supérieures à $\sim 10^{-4}$ pb, et dans le cas défavorable d'un taux de bruit de fond résiduel important (50%), on attend une carte de reculs telle que présentée sur la figure 1. Dans le cadre d'une analyse de vraisemblance, nous avons montré [2] qu'une telle mesure permettrait de reconstruire une direction des événements en direction du Cygne (20°), correspondant à une découverte à 3σ .

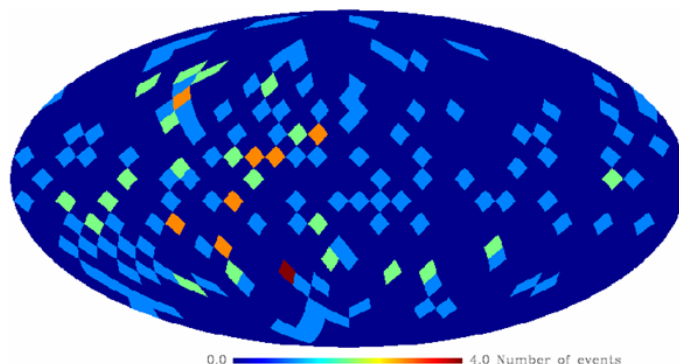


Fig. 1 : Données simulées pour un détecteur CF₄ avec une exposition de 30 kg.an. Figure extraite de [2].

Il s'agit d'un changement de perspective vis-à-vis de la détection directe de matière sombre. On passe en effet d'une stratégie de rejet du bruit de fond à une stratégie d'identification du signal WIMP.

Pour des sections efficaces WIMP-nucléon supérieures à $\sim 10^{-3}$ pb, nous avons montré [3] qu'une analyse multivariée (MCMC) des données directionnelles permettrait d'en extraire : la masse et la section efficace du WIMP, ainsi que les

propriétés du halo galactique lui-même (dispersions des vitesses). À titre d'exemple, on présente sur la figure 2, les contraintes obtenues sur la masse et la section efficace à l'aide de données simulées (CF₄ avec une exposition de 30 kg.an). Il s'agirait donc d'une mesure unique des propriétés du WIMP et du halo galactique.

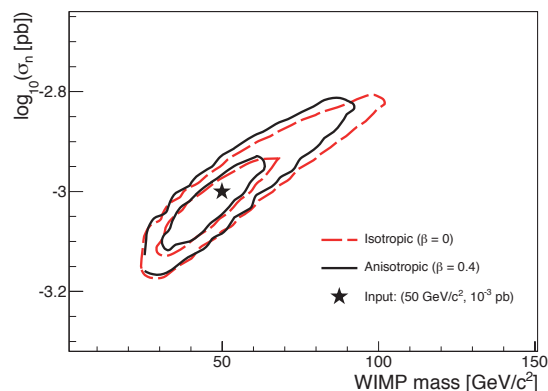


Fig. 2: Contraintes (68% et 95%) sur la masse et la section efficace pour un détecteur directionnel CF₄ (30 kg.an). Figure extraite de [2].

Design du détecteur

La détection directionnelle nécessite la reconstruction de l'énergie et de la trace 3D du noyau de recul et ce jusqu'à très basse énergie (~1 keV). Il s'agit d'un défi expérimental qui nécessite de très importants développements au niveau de l'électronique et du détecteur lui-même.

Le prototype construit au LPSC constitue l'une des chambres de la matrice de détecteurs. Le but est de montrer les performances d'un tel détecteur, en terme de reconstruction de l'énergie et de la trace, dans l'objectif de la détection directionnelle.

Le détecteur proposé par le LPSC est un μ TPC au CF₄ fonctionnant à très basse pression (50 mbar). Suite à l'ionisation les électrons produits dérivent sous l'effet du champ électrique de collection (~100 V/cm) jusqu'à la grille (micromesh). Dans la zone d'avalanche, un champ électrique plus intense (~16 kV/cm) permet ensuite d'amplifier le signal, avec un gain de l'ordre de 3000 pour une zone d'avalanche de 256 μ m. L'utilisation d'une micromegas pixelisée [4] (à 350 microns) permet d'accéder à la projection de la trace sur l'anode et de mesurer ses coordonnées x et y. La troisième coordonnée est obtenue par une lecture de l'anode avec une fréquence de 50 MHz. En connaissant la vitesse de dérive des électrons, dans ce mélange gazeux et pour ce champ électrique, il est ainsi possible de reconstruire la coordonnée en z.

Une électronique dédiée a été développée par le service d'électronique du LPSC [5,6]. Il s'agit d'une électronique auto-déclenchée comportant un ASIC 64 voies, dans sa nouvelle version, et son acquisition associée. Elle comporte un traitement embarqué qui permet en particulier de limiter le transfert de données à la partie utile uniquement (énergie et coordonnées des pixels touchés). Elle permet la lecture l'anode toutes les 20 ns, ce qui ouvre la possibilité de reconstruire une trace de quelques millimètres, en trois dimensions qui est un atout majeur du projet MIMAC.

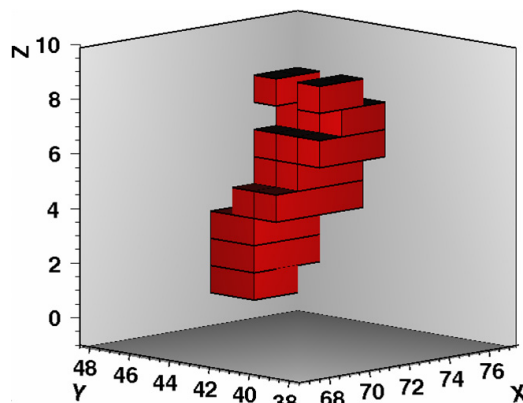


Fig. 3: Trace 3D d'un candidat Fluor à 50 keV.

Le développement de cette ligne de R&D a été possible, entre autres, grâce à l'ANR MIMAC-Projet Blanc (11/2007-11/2010).

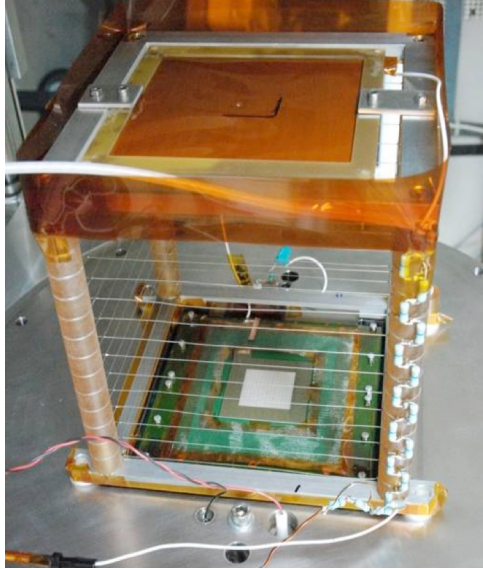


Fig. 4: Photo du prototype MIMAC. De haut en bas : la cathode, l'espace de dérive (18 cm) et l'anode pixelisée équipée d'une Micromegas.

Pour en savoir plus

¹ J. Billard, F. Mayet, D. Santos, *Phys. Rev. D* 82 (2010) 055011

² J. Billard et al., *Phys. Lett. B* 691 (2010) 156

³ J. Billard, F. Mayet, D. Santos, *Phys. Rev. D* 83 (2011) 075002

⁴ F. J. Iguaz et al., *JINST* 6 (2011) P07002

⁵ O. Bourrion et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* 662 (2010) 207

⁶ J.-P. Richer et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* 620 (2010) 470

